

# 재해석자료를 이용한 한반도 해상의 기준풍속 추정

김현구<sup>1)\*</sup> · 김보영<sup>2)</sup> · 강용혁<sup>3)</sup> · 하영철<sup>4)</sup>

## Estimation of Reference Wind Speeds in Offshore of the Korean Peninsula Using Reanalysis Data Sets

Hyun-Goo Kim<sup>1)\*</sup> · Boyoung Kim<sup>2)</sup> · Yong-Heack Kang<sup>3)</sup> · Young-Cheol Ha<sup>4)</sup>

Received 20 August 2021 Revised 21 December 2021 Accepted 5 December 2021 Published online 21 December 2021

**ABSTRACT** To determine the wind turbine class in the offshore of the Korean Peninsula, the reference wind speed for a 50-y return period at the hub height of a wind turbine was estimated using the reanalysis data sets. The most recent reanalysis data, ERA5, showed the highest correlation coefficient (R) of 0.82 with the wind speed measured by the Southwest offshore meteorological tower. However, most of the reanalysis data sets except CFSR underestimated the annual maximum wind speed. The gust factor of converting the 1 h-average into the 10 min-average wind speed was 1.03, which is the same as the WMO reference, using several meteorological towers and lidar measurements. Because the period, frequency, and path of typhoons invading the Korean Peninsula has been changing owing to the climate effect, significant differences occurred in the estimation of the extreme wind speed. Depending on the past data period and length, the extreme wind speed differed by more than 30% and the extreme wind speed decreased as the data period became longer. Finally, a reference wind speed map around the Korean Peninsula was drawn using the data of the last 10 years at the general hub-height of 100 m above the sea level.

**Key words** Offshore wind energy(해상풍력), Reference wind speed(기준풍속), Wind turbine class(풍력터빈등급), Reanalysis data(재해석자료), Gumbel distribution(검벨분포), Gust factor(돌풍계수)

### 1. 서론

풍력터빈은 다양한 외부조건 하에서 운전되며 피로(fatigue)

및 극한(extreme) 기계하중(mechanical loading)의 영향을 받는다. 풍력터빈의 국제기준인 IEC 61400-1:2019에서는 이러한 외부조건을 4가지 등급(I, II, III, S)으로 구분하여 풍력터빈을 설계하도록 하고 있다.<sup>[1]</sup> 특히 극한하중은 풍력터빈 허브높이(hub height)에서 재현기간 50년에 대해 10분 평균 극치풍속(extreme wind speed)을 기준풍속(reference wind speed)으로 정한다. 재현기간 50년 이상의 극치풍속은 통상 30년 이상의 장기간 풍속자료를 이용하여 통계적으로 추정하며, 이때 보편적으로 검벨분포(Gumbel distribution)를 사용한다.

건축구조기준(KBC 2016)에서는 건축물의 풍하중 설계

1) Principal Researcher, Chief, New & Renewable Energy Resource Map Laboratory, Korea Institute of Energy Research

2) Senior Researcher, New & Renewable Energy Resource Map Laboratory, Korea Institute of Energy Research

3) Principal Researcher, New & Renewable Energy Resource Map Laboratory, Korea Institute of Energy Research

4) Professor, School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology

\*Corresponding author: hyungoo@kier.re.kr  
Tel: +82-42-860-3376

(wind load design)를 위해 지상 10 m 높이에서 재현기간에 따른 10분 평균 기본풍속(basic wind speed)을 기준으로 제시하고 있으며,<sup>[2]</sup> 국지적으로는 지면조도, 지형할증 등의 영향을 보정하여 사용하도록 한다.<sup>[3]</sup> 건축구조기준의 기본풍속은 기상청의 장기간 지상관측자료를 통계적으로 분석하여 산정되었기 때문에<sup>[4]</sup> 공간적으로는 기상관측지점에만 국한되며 더욱이 기상관측자료가 없는 해상에서는 산정되어 있지 못하다.

Lee et al.(2011; 2012)은 공간적인 제약을 극복하고자 수치기상예측(numerical weather prediction)에 의한 1시간 평균풍속을 3초 및 10분 평균 최대풍속으로 변환하여 육상에서의 기준풍속을 추정할 수 있으며<sup>[5,6]</sup> 해상에서는 Kim et al.(2012)이 서남해상 해모수 해상기상탑의 1년간 측정자료를 이용하여 기준풍속을 추정할 수 있다.<sup>[7]</sup> 한편 기준풍속의 통계적 추정을 위해서는 단기간 측정자료를 장기간으로 보정하여야 하며, 이 경우 불확도가 증가한다.<sup>[8]</sup> 최근에는 재해석자료의 신뢰도가 향상됨에 따라<sup>[9]</sup> 장기간 재해석자료를 이용하여 기준풍속을 산정하는 추세이다.<sup>[10, 11]</sup> 그러나 재해석자료를 이용하여 기준풍속을 추정할 경우, 내륙과 산지에서는 재해석자료의 공간해상도가 낮은 관계로 상당한 오차가 발생함이 보고되고 있다.<sup>[12]</sup>

한편 한반도 풍력자원평가의 참고자료로 활용되고 있는 한국에너지기술연구원 풍력자원지도는 2010년부터 2018년까지 9년간의 자료기간에 대해 구축되어 있기 때문에<sup>[13]</sup> 극치풍속 추정에 필요한 장기간의 요건을 만족하지 못한다.

최근 110년간 한반도에 영향을 미친 태풍 중 최대풍속과 피해규모로 산정한 순위 1위부터 5위까지가 모두 2000년대 이후에 발생하였다. 기후변화의 영향으로 한반도에 내습하는 태풍의 빈도 및 강도가 증가할 뿐 아니라 경로도 바뀌고 있다.<sup>[14]</sup> 따라서 극치풍속 추정을 위한 과거자료의 기간을 선택할 때 이러한 기후변화 특성을 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 한반도 해상영역에 대해 재해석자료의 연간 최대풍속으로부터 검분포를 이용하여 풍력터빈 등급 결정을 위해 허브높이에서 재현기간 50년의 기준풍속을 추정하였다. 재해석자료의 1시간 평균풍속을 10분 또는 3초 평균풍속으로 변환하기 위하여 돌풍계수(gust factor)를 적용하였으며, 그 값의 적정성을 다수의 해상 및 해안 측정

자료로 검증하였다. 또한 장기간의 과거자료를 이용하여 기준풍속을 추정할 경우 근래의 태풍 영향이 과소평가될 우려가 있으므로, 극치통계분석을 위한 과거자료의 기간에 따른 기준풍속 추정 민감도를 평가하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 극치풍속 산정

50년 또는 100년 재현기간(return period,  $T$ )에 대한 연간 최대풍속의 극치값( $V$ )은 다음과 같은 검분포 함수( $F$ )를 이용하여 추정할 수 있다.

$$F(V) = \exp\left\{-\exp\left[\frac{-(V-\mu)}{\beta}\right]\right\} \quad (1)$$

$$V = \mu - \beta \cdot \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2)$$

여기서  $\beta, \mu$ 는 각각 척도계수(scale parameter) 및 모드계수(mode parameter)이다.

재해석자료의 연간 최대풍속  $v_i$ 를 검분포 확률지에 도시할 때 경험적비초과확률  $F(v_i)$ 는 헤이즌(Hazen) 도시위치(plotting position) 공식으로 표현할 수 있다.<sup>[15]</sup>

$$F(v_i) = 1 - \frac{i - 0.5}{N} \quad (3)$$

여기서  $i$ 는 내림차순의 순위이고  $N$ 은 자료의 개수이다. 분포함수의 적합성은 다음과 같이 관측값( $v_i$ )과 기댓값( $V_i$ )의 제곱평균제곱근(root mean square)으로 평가하였다. 즉, 오차가 10% 이내이면 적합하다고 판단하였다.<sup>[5]</sup>

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - v_i)^2} \bigg/ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (4)$$

### 2.2 돌풍계수 산정

풍력터빈 국제표준인 IEC 61400-1:2019에서는 재현기간 50년에 대해 허브높이에서 풍속의 10분 평균값과 3초

첨두값을 각각 기준풍속(reference wind speed)과 돌풍 풍속(gust wind speed)으로 정의하고 있다.<sup>[1]</sup> 반면 재해석자료의 기상요소는 1시간 평균 자료이므로 다른 시간평균으로 변환하려면 다음과 같이 정의되는 돌풍계수( $G_{\tau, T_0}$ )를 적용할 수 있다.

$$V_{\tau, T_0} = G_{\tau, T_0} \cdot V_{T_0} \quad (5)$$

여기서  $\tau$ 는 돌풍 지속시간(gust duration, s)이고  $T_0$ 는 기준기간(reference period, s)이다. 즉, 1시간 평균풍속  $V_{3600}$ 을 이용하여 10분 평균 최대풍속으로 변환하려면 돌풍계수  $G_{600,3600}$ 을, 3초 첨두 돌풍풍속으로 변환하려면  $G_{3,3600}$ 을 적용하면 된다.<sup>[16]</sup>

돌풍계수는 자연풍의 난류 특성에 의존적이므로 한반도에서도 문헌에 제시된 것과 동일한 계수값인가에 대해서는 검증이 필요하다. 본 연구에서는 해모수 해상기상탑을 비롯하여 풍력터빈 허브높이에 해당하는 지상 50 m 높이 이상에서 IEC 61400-12:2017을 준수하며<sup>[17]</sup> 다수의 지점에서 측정된 10분 평균 풍속자료를 이용하여 돌풍계수( $G_{600,3600}$ ,  $G_{3,600}$ ,  $G_{3,3600}$ )의 적정성을 검증하였다.

### 2.3 재해석자료

극치풍속 추정을 위해서는 수십년간의 연간 최대풍속을 추출하여야 한다. 이를 위해 재해석자료인 미국 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서

제공하는 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis),<sup>[18]</sup> 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 MERRA-2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2),<sup>[19]</sup> 그리고 유럽연합 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA5를<sup>[20]</sup> 이용하였다. 즉, 1980년부터 2014년까지 35년간의 1시간 평균풍속 중 연간 최대풍속을 추출하여 극치풍속 추정에 사용하였다.

본 연구에서 사용된 재해석자료의 개요와 출처는 Table 1에 정리하였다. 참고로 MERRA와 ERA Interim은 각각 MERRA-2와 ERA5의 이전 버전으로 4차원 자료동화(data assimilation) 등의 기능을 추가하여 정확도가 향상되었다. 한편 Kim et al.(2018)이 한반도 서남해상에 대해 제3세대 재해석자료를 비교·검증한 바에 의하면 해상기상탑 측정자료와의 접합도는 CFSR과 MERRA-2가 동등 수준인 것으로 나타났다.<sup>[9]</sup>

극치풍속 추정시 자료기간의 민감도를 평가하기 위하여 36년간의 전체 자료기간(1979~2014)을 기준으로 5년 간격으로 10년간의 자료기간을 적용하여 극치풍속을 추정하였다. 즉, 1980~1989, 1985~1994, 1990~1999, 1995~2004, 2000~2009, 2005~2014의 자료기간을 적용하였다. 특히 해모수 해상기상탑 지점에 대해서는 측정자료와 재해석자료의 최대풍속을 비교하여 재해석자료의 예측 오차를 분석하였다. 또한 자료기간을 최근 5년간으로부터 40년간까지 5년 단위로 연장해가며 자료기간에 따른 극치풍속을 비교·분석하였다.

Table 1. Description of reanalysis data sets

Data sets	Spatial resolution (pressure level)	Temporal resolution (data coverage)	Variables	Sources
CFSR	0.5° × 0.5° (37)	1 h (1979–present)	u, v, w, q, t, u10, v10, p0	<a href="http://rda.ucar.edu/pub/cfsr.html">http://rda.ucar.edu/pub/cfsr.html</a>
MERRA	0.67° × 0.5° (72)	1 h (1979–present)	u, v, w, t, q, u10, v10, p0	<a href="http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/">http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/</a>
MERRA-2	0.5° × 0.5° (42)	1 h (1980–present)	u, v, w, t, q, u10, v10, p0	<a href="https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/">https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/</a>
ERA-Interim	0.125° × 0.125° (37)	3 h (1979–present)	u, v, w, r, q, t, u10, v10, p0	<a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim</a>
ERA5	0.25° × 0.25° (37)	1 h (1979–present)	u, v, w, r, q, t, u10, v10, p0	<a href="https://www.ERA5.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5/">https://www.ERA5.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5/</a>

### 2.4 풍력자원 측정자료

WMO에 제시된<sup>[16]</sup> 돌풍계수가 한반도 해상영역에서도 유효한지 검증하기 위해 Table 2와 같이 다수의 풍력자원 측정자료를 사용하였다. 즉, 서남해 해상기상탑 해모수 1, 2호기의 측정자료,<sup>[9]</sup> 고리 원자력발전소 해안부지<sup>[21]</sup> 및 신안군 비금도 해안에서의<sup>[22]</sup> 라이다(LiDAR) 측정자료, 제주도 김녕<sup>[8]</sup> 및 고창 해안에서의<sup>[9]</sup> 고층기상탑 측정자료이다. 이들은 모두 지상/해상 50 m 이상의 다중 높이에서 IEC 61400-12-1:2017의 표준에 따라<sup>[17]</sup> 측정된 자료이며 10분 평균 및 3초-첨두 풍속자료이다. 단, 이들은 서해상 및 해안의 고층기상탑 측정자료이므로 한반도 전해상의 특성을 대표한다고 보기는 어렵다.

Table 2. Wind resource measurement data sets

Data sets	Location	Method	Period
Gochang	West onshore	Met-tower	2008.11-2011.09
Gori	East onshore	LiDAR	2018.02-2019.02
HeMOSU-1	West offshore	Met-tower	2010.10-2016.03
HeMOSU-2	West offshore	Met-tower	2014.01-2015.07
Kimnyeong	Jejudo onshore	Met-mast	2008.03-2008.09
Shinan	Southwest onshore	LiDAR	2009.11-2010.03

## 3. 연구결과

### 3.1 돌풍계수 산정

해상과 해안에서 IEC 61400-12-1:2017을 준용하여 측정된 풍속자료를 이용하여 돌풍계수를 산정하였고, 이를 WMO의 돌풍계수와 비교한 결과를 Table 3에 제시하였다. 단, WMO는 지상/해상 10 m 높이를 기준으로 하였으나 우리나라 측정자료는 50 m 높이를 기준으로 하였다.

Fig. 1은 해모수 해상기상탑 풍속자료를 이용하여 높이에 따른 돌풍계수를 산정한 결과이며, 해모수 1, 2호기 간의 차이는 없는 것으로 나타났다. 대기경계층(atmospheric boundary layer)은 지면 또는 수면에 가까울수록 표면과의 마찰로 인하여 난류강도(turbulence intensity)가 증가하며, 이에 따라서 돌풍계수도 증가한다.<sup>[5]</sup>

Table 3. Gust factors calculated with in-situ measurements

Data sets	Location	G <sub>3,600</sub>	G <sub>3,3600</sub>	G <sub>600,3600</sub>
WMO <sup>[14]</sup>	Onshore	1.38	1.45	1.05
	Offshore	1.23	1.30	1.03
Gochang	Onshore	1.17	1.22	1.03
Gori	Onshore	1.37	1.47	1.05
HeMOSU-1	Offshore	1.17	1.21	1.03
HeMOSU-2	Offshore	1.18	1.22	1.03
Kimnyeong	Onshore	1.26	1.29	1.02
Shinan	Onshore	1.19	1.23	1.03

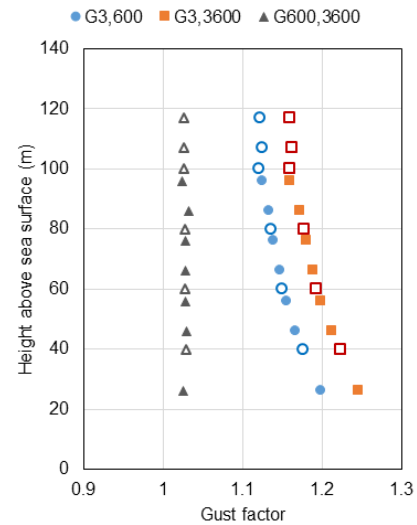


Fig. 1. Comparison of maximum wind speeds between reanalysis data sets (filled symbols: HeMOSU-1, hollow symbols: HeMOSU-2)

Table 3에서 해상보다 해안의 돌풍계수가 높은 이유도 표면거칠기가 더 크기 때문이며, 해안 대비 해상의 돌풍계수는 WMO는 2~12%, 우리나라 측정자료는 약 7%가 높은 것으로 산정되었다. 다만 주풍향이 서풍인 서해안에 설치된 고창 고층기상탑의 측정결과는 해모수와 불확도 범위 내에서 동일한 값을 보이는데, 이는 해모수 해상와 고창 해안이 동일한 해상풍의 영향권에 포함됨을 의미한다.<sup>[9]</sup> 결과적으로 돌풍계수 G<sub>600,3600</sub>의 경우, 우리나라 풍력자원 측정자료로부터 산정한 계수와 WMO에서 제안한 계수가 정확히 일치함을 확인하였다. 그러나 G<sub>3,600</sub>과 G<sub>3,3600</sub>의 경우에는 WMO가 다소 큰 값을 제시하고 있어, 이에 대해서는 충분한 측정자료를 확보하여 추가적인 검증을 진행할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.2 극치풍속 산정

극치풍속 추정에 사용할 재해석자료를 선정하기 위하여 5년 이상의 측정자료가 확보된 해모수 해상기상탑 1호와 재해석자료간의 1시간 평균풍속 상관도를 평가하였다(Table 4). 피어슨 상관계수(R)에 의하면 제4세대 재해석자료인 ERA5의 정확도가 가장 우수하며 제3세대에서는 CFSR이 그 다음으로 우수한 것으로 평가되었다.

한편 극치풍속은 연도별 최대풍속으로 추정하기 때문에 그 차이를 분석하기 위해 한반도 영역(33°N~43°N, 124°E~131°E)에서 출현한 연도별 최대풍속의 그래프를 Fig. 2에 도시하였다. ERA5와 MERRA-2는 거의 동일한 연간 최대풍속을 분석한 반면(R=0.78) CFSR은 약 10% 높은 최대풍속을 분석하였다.

본 연구에서는 보수적인 관점에서 기준풍속을 추정하기 위해서 시간별 풍속의 정확도는 유사한 수준이지만 상대적으로 연간 최대풍속을 과소평가하지 않은 CFSR을 주 해석자료로 선택하였다. 참고로 Kim et al.(2018)이 전지구 재해석자료를 비교·분석한 결과에서도 CFSR은 고풍속의 출현빈도를 높게 분석한 특성이 보고된 바 있다.<sup>[23]</sup>

Fig. 3은 한반도 영역에 대해 추정된 재현기간 50년의 기준풍속 바람지도로, 최근 설치되는 대형 풍력터빈의 일반적인 허브높이인 지상/해상 100 m 높이를 기준으로 산정되었다. 즉, 35년간의 연도별 1시간 평균 최대풍속을 Eq. (1)의 검별분포에 접한 후 Eq. (2)를 이용하여 재현주기

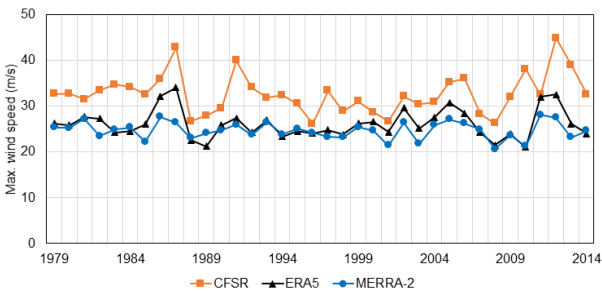


Fig. 2. Comparison of annual maximum wind speeds between reanalysis data sets

Table 4. Correlation coefficients between HeMOSU-1 wind speed and reanalysis data sets at 50 m above sea level

CFSR	MERRA	MERRA-2	ERA-Interim	ERA5
0.79	0.74	0.78	0.74	0.82

50년에서의 기준풍속을 추정하고 이를 Eq. (5)의 돌풍계수를 적용하여 10분 평균 기준풍속으로 변환한 것이다.

Fig. 3에 표시된 검은색 원은 연도별 최대풍속의 출현지점을 표시한 것으로, 주로 태풍경로인 남동해상에서 빈도가 높게 나타난다. 기준풍속도 태풍경로인 남동해상에서 44.7 m/s로 가장 높게 추정되었다. 참고로 CFSR의 검별분포 접합오차(E)는 2% 수준이며 MERRA-2, ERA5에 비해서도 접합오차가 낮은 것으로 나타났다.

Na et al.(2019)이 한반도 태풍경로별 최대풍속의 분포특성을 분석한 연구결과에 따르면,<sup>[14]</sup> 2002년부터 2015년까지 한반도의 서쪽과 동쪽을 통과한 태풍의 비율이 84%:16%임에도 불구하고 동쪽의 대한해협을 통과한 태풍의 강도가 월등히 높았으며, 이는 Fig. 3과도 정확하게 일치한다. 참고로 본 연구에서 재해석자료의 신뢰도 검증과 돌풍계수 검증은 해상 및 해안에 대해서만 수행하였기 때문에 Fig. 3은 육상을 제외한 해안과 해상에 대해서만 적용함이 바람직하다.

Fig. 4는 연간 최대풍속의 분산을 최대풍속 평균으로 무차원화한 변동계수(coefficient of variance) 분포도로, 강

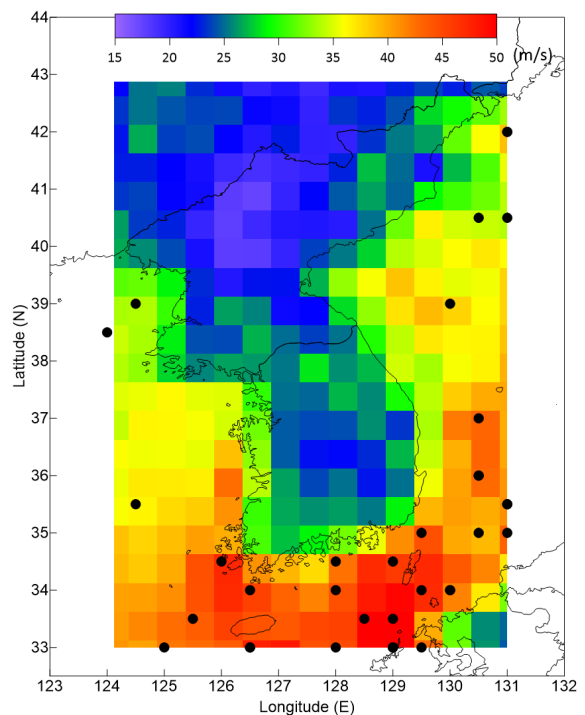


Fig. 3. Extreme wind speed map of the Korean Peninsular (CFSR, black circles: occurrence position of annual maximum wind speed)

원도 동편에서 20% 수준의 가장 높은 최대풍속 변동성이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 IEC 61400-1:2019에 제시된 풍력터빈 등급(wind turbine class)을 적용한 지도이다. I 등급(high

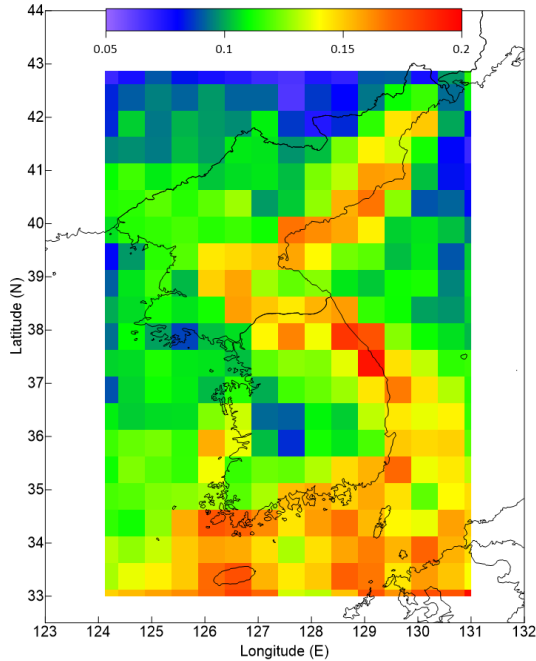


Fig. 4. Coefficient variance of maximum wind speed map

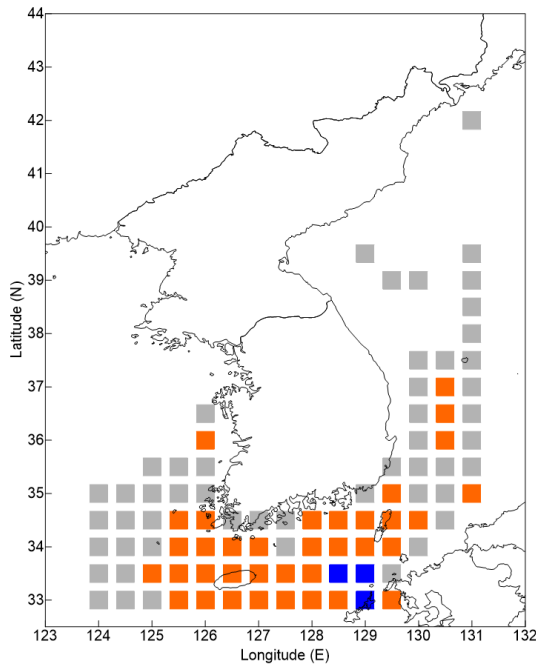


Fig. 5. Wind turbine class around the Korean Peninsular at 100 m above sea (blue: I, orange: II, grey and white: III)

wind, 기준풍속 50 m/s)은 대마도 남서해상에서 부분적으로 나타나며, 한반도 남해상 및 한일해협을 따라서 II 등급 (medium wind, 42.5 m/s)이 분포하고 있으며 III 등급 (low wind speed, 37.5 m/s)은 서남해상과 동해상으로 올라가는 분포이다. 흰색으로 등급이 표시되지 않은 해상은 III 등급 이하에 해당되며, S 등급은 특수한 외부조건 등을 고려하여 설계자가 값을 설정(specified)하는 등급이다. 한편 해모수 해상기상탑 설치위치는 II 등급으로 분류되었는데, 이는 2012년 15호 태풍 볼라벤(Bolaven)이 서해를 따라 북상하며 극치를 갱신하였기 때문으로 설명된다.

### 3.3 자료기간 민감도

극치풍속 추정에 사용된 재해석자료의 자료기간에 따라 유의한 차이가 나타났다. Fig. 6은 한반도 영역에서 자료기간에 따른 극치풍속의 통계분포를 나타낸 것으로, 36년간의 재해석자료를 이용한 경우 가장 낮은 극치풍속(51.9 m/s)을 추정한 반면, 최근 10년간(2005~2014)의 자료기간을 적용했을 때 가장 높은 극치풍속(30.1 m/s)이 추정되었다. 10년간의 자료기간 중에서는 1995~2004 기간에 가장 낮은 극치풍속(38.5 m/s)이 추정되었으며, 자료기간의 연대에 따라 30% 이상의 차이가 발생하였다. 이러한 분석 결과로부터 태풍내습에 따라 극치풍속 추정에 유의한 차이가 발생할 수 있음을 확인하였으며, 보수적인 관점에서 극치풍속 추정에는 최근 10년간 기후변화의 영향이 포함된 자료기간을 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 해모수 1호 측정자료와 동일 지점의 ERA5 재해석자료의 연간 1시간 평균 최대풍속을 비교한 것으로, ERA5는 원으로 표시한 해모수 측정자료와 2% 수준의 차

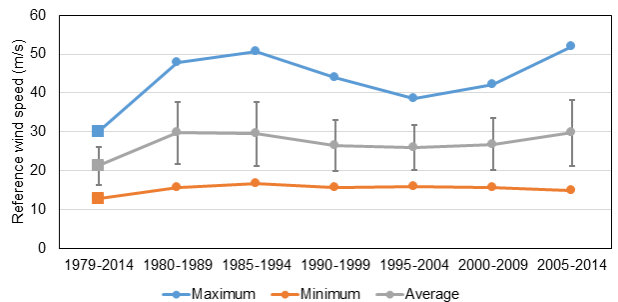


Fig. 6. Estimated extreme wind speeds by reanalysis data periods (10 years at 5 year intervals)

이만 보이는 매우 정확한 예측값을 제공한다. 서해상으로 1990년대 중반까지 태풍내습이 없다가 기후변화로 인한 태풍진로의 변화로 연간 최대풍속이 증가하다가 2012년도 볼라벤이 내습하면서 극치값을 갱신하게 되었다.

Fig. 8은 ERA5의 자료기간에 따른 극치풍속을 나타낸 그래프로, 최근 5년간으로부터 최근 40년까지 5년씩 자료기간이 길어질수록 극치풍속도 감소하는 경향을 보인다. 자료기간에 따른 극치풍속을 선형회귀하면 자료기간이 5년씩 증가할수록 1.9 m/s씩 극치풍속이 감소하며, 자료기간 10년간 대비 40년간일 경우 해모수 지점에서의 재현기간 50년의 극치풍속은 무려 9.6 m/s의 차이가 발생한다.

자료기간의 증가에 따른 극치풍속의 감소 경향은 Wang and Li(2016)가 남중국해를 대상으로 장기간 수치기상에 측 자료를 이용하여 수행한 비정상성(non-stationary) 분석에서도 분명하게 나타났다.<sup>[24]</sup> 즉, 과거 대비 최근의 수치기상예측 자료를 사용할수록 극치풍속이 감소하는 경향도 동일하게 나타났으며, 결론적으로 비정상적이며 불균일한 태풍강도 및 발생빈도의 영향으로 극치풍속 추정시 자료기간에 따른 유의한 차이가 발생하므로 특별한 고려가 요구됨을 지적하였다.

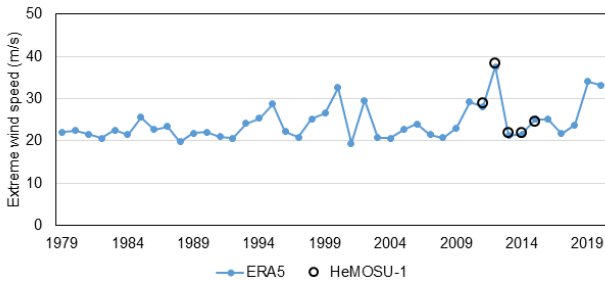


Fig. 7. Annual maximum wind speeds of ERA5 at the HeMOSU-1 site (hollow circle: HeMOSU-1 data)

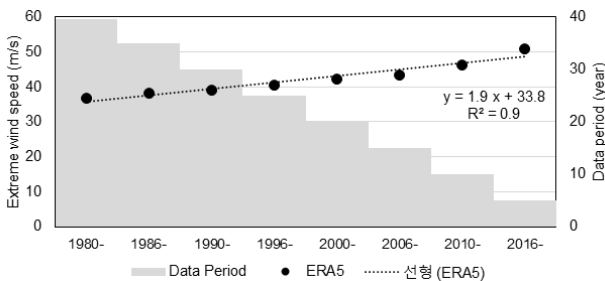


Fig. 8. Estimated extreme wind speeds by reanalysis data periods (from the last 5 years to 40 years)

#### 4. 결론 및 제언

본 연구는 한반도 해상에서 IEC 61400-1:2019에 따라 풍력터빈 등급을 결정하기 위해 재해석자료를 이용하여 허브높이 100 m에서 재현기간 50년의 기준풍속을 산정하였으며, 극치통계의 자료기간과 연대에 대한 검토가 반드시 필요함을 확인하였다. 본 연구의 주요 결론을 정리하면,

- 1) 최신 재해석자료인 ERA5는 서남해 해상기상탑 측정 풍속과의 상관도(R)가 0.82로 가장 높았으나 CFCSR 이 상대적으로 연간 최대풍속을 과소평가하지 않는 것으로 분석되었다. 이에 극치풍속 추정에 CFCSR 을 이용하였다. 1시간 평균 풍속을 10분 평균풍속으로 변환하기 위해 돌풍계수를 적용하기에 앞서, 다수의 고층기상탑 및 라이더 측정자료로 WMO의 제안값을 검증하여 동일한 계수값인 1.03임을 확인하였다.
- 2) 기후변화로 인하여 한반도에 내습하는 태풍의 주기, 빈도, 경로가 변하고 있으며, 이로 인하여 자료기간에 따른 극치풍속 추정에 유의미한 차이가 발생하였다. 즉, 자료기간 연대에 따라 30% 이상의 차이가 발생했으며, 자료기간이 길어질수록 극치풍속 추정값이 감소함을 확인하였다. 즉, 최근 10년간의 자료기간을 사용했을 때 가장 강한 극치풍속을 추정하였다.
- 3) 한반도 남해상과 제주는 풍력터빈 등급으로 II 등급에 해당하며 서남해와 동해는 III 등급이지만 해모수 지점은 태풍 볼라벤의 영향으로 극치풍속이 높아져 II 등급으로 산정되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 표준화기술개발사업 연구비 지원을 받은 결과물입니다(K\_G012001622501).

## References

- [1] International Electrotechnical Commission, 2019, IEC 61400-1:2019, “Wind Energy Generation Systems - Part 1: Design Requirements”, Edition 4, 347.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016, “Korean Building Code and Commentary: 0305 Wind Load”, 108-109.
- [3] Kim, J.H., and Kim, J.Y., 2017, “A study on estimation of basic wind speed considering topography and surface roughness around the weather station”, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, **21**(4), 187-196.
- [4] Ha, Y.C., 2016, “Revised wind loads in KBC 2016”, *JAIK*, **60**(9), 31-38.
- [5] Lee, B.H., Kim, H.G., and Ha, Y.C., 2011, “An estimation of wind speeds for return period in Jeju Island for investigating wind scale of wind turbines”, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, **15**(2), 37-44.
- [6] Lee, B.H., Ahn, D.J., Kim, H.G., and Ha, Y.C., 2012, “An estimation of the extreme wind speed using the Korea wind map”, *Renew. Energy*, **42**, 4-10.
- [7] Kim, J.Y., Oh, K.Y., and Lee, J.S., 2012, “An estimation of extreme wind speed according to return periods of demonstration offshore wind farm in the southern part of west sea”, *Wind Energy*, **3**(1), 10-18.
- [8] Seo, H.S., Kyong, N.H., and Kim, H.G., 2010, “Analysis on wind characteristics for offshore wind turbine structure design at Waljeong, Jeju-do”, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, **14**(3), 161-167.
- [9] Kim, H.G., Kim, J.Y., and Kang, Y.H., 2018, “Comparative evaluation of the third-generation reanalysis data for wind resource assessment of the southwestern offshore in South Korea”, *Atmosphere*, **9**(2), 73.
- [10] Jung, C., Schindler, D., Buchholz, A., and Laible, J., 2017, “Global gust climate evaluation and its influence on wind turbines”, *Energies*, **10**(10), 1474.
- [11] Pryor, S.C., and Barthelmie, R.J., 2021, “A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications”, *Nat. Energy*, **6**(268), 268-276.
- [12] Minola, L., Zhang, F., Molina, C.A., Pirooz, A.A.S., Flay, R.G.J., Hersbach, H., and Chen, D., 2020, “Near-surface mean and gust wind speeds in ERA5 across Sweden: towards an improved gust parametrization”, *Clim. Dyn.*, **55**, 887-907.
- [13] Kim, H.G., Kim, J.Y., Park, J.K., and Lee, Y.M., 2020, “Inter-annual variability analysis of wind resource in the Korean peninsula using wind resource map”, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, **24**(2), 71-77.
- [14] Na, H.N., Jung, W.S., and Park, J.K., 2019, “A study on the characteristics of maximum wind speed distributions by typhoon track in the Korean peninsula”, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **35**(1), 36-48.
- [15] Hazen, A., 1913, “Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply”, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, **39**(9), 1943-2044.
- [16] Harper, B.A., Kepert, J.D., and Ginger, J.D., 2010, “Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions”, *World Meteorological Organization (WMO)*, WMO/TD-No. 1555.
- [17] International Electrotechnical Commission, 2017, IEC 61400-12-1:2017, “Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines”, Edition 2, 558.
- [18] Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., and Behringer, D., et al., 2010, “The NCEP climate forecast system reanalysis”, *Bull. Amer. Meteor.*, **91**(8), 1015-1058.
- [19] Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., and Bacmeister, J., 2015, “Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2”, *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1339-1356.
- [20] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., and Schepers, D., et al., 2020, “The ERA5 global reanalysis”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**(730), 1999-2049.
- [21] Kim, H.G., Kim, H.Y., and Kim, S.W., 2019, “Offshore wind resource assessment of the Gori power plant using onshore lidar measurements”, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, **23**(1), 31-36.
- [22] Kim, H.G., and Kim, J.Y., 2021, “Analysis of wind turbine aging through operation data calibrated by LiDAR measurement”, *Energies*, **14**(8), 2319.
- [23] Kim, H.G., Kim, J.Y., and Kim, H.Y., 2018, “Long-term statistical analysis of global wind resources using reanalysis data”, *Wind Energy*, **9**(3), 19-24.
- [24] Wang, L., and Li, J., 2016, “Estimation of extreme wind speed in SCS and NWP by a non-stationary model”, *Theor. Appl. Mech. Lett.*, **6**(3), 131-138.